

REVIEW ARTIKEL : PRODUKSI BIODIESEL DARI MINYAK GORENG BEKAS DENGAN METODE TRANSESTERIFIKASI MENGGUNAKAN KATALIS

REVIEW ARTICLE: BIODIESEL PRODUCTION FROM WASTED FRYING OIL WITH TRANSESTERIFICATION METHOD USING CATALYST

Aditya Arif Budiman dan Samik Samik*

Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Universitas Negeri Surabaya

Jl. Ketintang, Surabaya (60231), Telp. 031-8298761

* Corresponding author, tel :085731160005, email: samik@unesa.ac.id

Abstrak. Minyak goreng bekas merupakan bahan baku energi terbarukan yang dapat digunakan untuk memproduksi biodiesel dengan biaya produksi yang lebih ekonomis karena merupakan limbah dan harganya yang murah atau bahkan gratis. Penggunaan minyak goreng bekas sebagai bahan baku biodiesel adalah tindakan yang ramah lingkungan karena dapat mengurangi pencemaran lingkungan terutama pada tanah dan air. Oleh karena itu, tujuan artikel ini adalah untuk menjelaskan pengolahan minyak goreng bekas menjadi bahan baku biodiesel dengan berbagai katalis yaitu katalis asam, basa, dan enzim baik yang homogen maupun heterogen. Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah mereview berbagai artikel tentang produksi biodiesel dengan metode transesterifikasi menggunakan katalis. Katalis yang umum digunakan adalah katalis asam (homogen, heterogen), basa (homogen, heterogen), dan enzim. Hasil dari berbagai literatur menunjukkan bahwa WFO dapat diubah menjadi biodiesel menggunakan berbagai katalis. Pada kondisi optimum katalis asam homogen seperti H_2SO_4 menghasilkan yield 95,37%. Katalis asam heterogen seperti $Fe_2O_3-MnO-SO_4^{2-} / ZrO_2$ menghasilkan yield 96,5%. Katalis basa homogen seperti NaOH menghasilkan yield biodiesel 98%. Katalis basa heterogen seperti CaO-MgO menghasilkan yield biodiesel 98,95%. Sedangkan pada katalis enzim seperti enzim Lipase dari *Candida rugosa* dan *Rhizomucor miehei* diperoleh yield biodiesel sebesar 96,5%. Dari hasil tersebut, katalis basa heterogen CaO-MgO merupakan katalis yang paling tinggi dalam menghasilkan yield biodiesel dari berbagai katalis yang lain.

Kata kunci : Minyak goreng bekas, Transesterifikasi, Biodiesel, Katalis.

Abstract. Waste frying oils are renewable energy raw materials that can be used to produce biodiesel at more economical production costs because they are waste and are cheap or even free. The use of WFO as a biodiesel raw material is an environmentally friendly measure as it can reduce environmental pollution, especially in soil and rivers. Therefore, the purpose of this article is to explain the processing of WFO into biodiesel raw materials with a variety of catalysts, including acid, base, and enzyme catalysts that are both homogeneous and heterogeneous. The method used in writing this article is to review various articles on the production of biodiesel with the transesterification method using catalysts that are acidic (homogenic and heterogenic), bases (homogenic and heterogenic), and enzyme catalysts. Results from various studies suggest that WFO can be converted into biodiesel using a variety of catalysts. Under optimal conditions, homogeneous acid catalysts such as H_2SO_4 produce yield biodiesel at 95.37%. Heterogeneous acid catalysts such as $Fe_2O_3-MnO-SO_4^{2-} / ZrO_2$ produce a yield of 96,5%. Homogeneous base catalysts such as NaOH produce a biodiesel yield of 98%. Heterogeneous base catalysts such as CaO-MgO produce biodiesel yields of 98,95%. Enzyme catalysts such as Lipase enzyme from *Candida rugosa* and *Rhizomucor miehei* produce biodiesel yields of 96,5%. From these results, the heterogeneous base catalyst CaO-MgO is the catalyst with the highest yield in producing biodiesel among various other catalysts.

Keywords: Waste Frying Oil, Transesterification, Biodiesel, catalysts.

1. PENDAHULUAN

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan yang terbuat dari minyak nabati atau lemak hewani. Bahan bakar ini merupakan bahan yang tidak beracun, dapat terurai secara alami, menghasilkan lebih sedikit sulfur dan hidrokarbon di udara, serta dapat digunakan pada mesin diesel yang sesuai dengan standar yang ditetapkan [1].

Biodiesel memiliki kandungan senyawa yang terdiri dari campuran mono alkil ester dan rantai panjang asam lemak. Senyawa ini terbentuk dari reaksi antara trigliserida dari minyak / lemak dengan alkohol rantai pendek (seperti metanol atau etanol) dengan bantuan katalis. Reaksi ini disebut dengan reaksi transesterifikasi [2].

Beberapa jenis minyak nabati yang dapat dikonsumsi seperti kacang kedelai, biji bunga matahari, dan minyak sawit dapat dijadikan bahan baku utama dalam memproduksi biodiesel. Namun, harga minyak nabati yang dapat dikonsumsi tersebut mahal serta persaingan dengan penggunaan sebagai bahan pangan merupakan kelemahan bagi produksi dan komersialisasi biodiesel [3].

Selama periode tahun 2010 hingga 2019, konsumsi bahan bakar solar di Indonesia berada dalam kisaran 2,5 juta ton hingga 3,5 juta ton per tahun. Sementara itu konsumsi biodiesel di Indonesia pada periode 2015 hingga 2019 berada dalam kisaran 180 hingga 283 ribu ton per tahun [4]. Limbah minyak goreng bekas yang dihasilkan di Indonesia terdiri dari 305 ribu ton pada sektor rumah tangga, 2 juta ton pada sektor industri pengolahan makanan, dan 1,5 juta ton dari sektor hotel dan restoran. Sehingga total limbah minyak goreng bekas yang dihasilkan di Indonesia mencapai 3,8 juta ton tiap tahun [5]. Oleh sebab itu penggunaan minyak goreng bekas (*WFO*) dianggap sebagai alternatif yang menjanjikan dalam produksi biodiesel, selain biayanya yang rendah juga tingkat ketersediaannya yang tinggi. Selain itu, penggunaan *WFO* sebagai bahan baku tidak mempengaruhi persaingan dengan permintaan pangan. Harga *WFO* sendiri jauh lebih murah dibanding minyak nabati lain yakni sekitar dua sampai tiga kali lebih rendah. Disamping itu menggunakan *WFO* sebagai bahan baku juga akan mengurangi tingkat polutan di air maupun di tanah [6].

Kandungan didalam *WFO* seperti senyawa triasilgliserol, air, asam lemak bebas (FFA), senyawa polar dan senyawa non-volatil yang dihasilkan selama proses memasak makanan dapat mempengaruhi reaksi transesterifikasi dengan penggunaan katalis homogen [7].

Pada metode produksi biodiesel menggunakan metode reaksi transesterifikasi, biodiesel yang dihasilkan melalui proses reaksi antara asam lemak bebas (trigliserida) dengan alkohol dengan bantuan katalis sehingga dihasilkan alkil ester [8]. Pada umumnya jenis katalis yang digunakan antara lain katalis homogen, heterogen dan katalis enzim [9].

Penggunaan katalis homogen memiliki efek positif seperti dapat menghasilkan yield biodiesel yang tinggi, waktu reaksi singkat, dan berjalan pada suhu rendah [10]. Namun, katalis ini memiliki kekurangan seperti pembentukan sabun dan potensi korosi [11]. Sementara itu katalis heterogen dapat mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh katalis homogen dan dapat digunakan secara berulang [12]. Namun, katalis ini juga memiliki kekurangan seperti rentan terhadap FFA pada minyak kualitas rendah [13]. Pada katalis enzim memiliki keunggulan pada aktivitas katalis yang tinggi serta ramah lingkungan, namun harga dari katalis ini cenderung mahal dan reaksinya membutuhkan waktu yang relatif lama [14].

Oleh sebab itu artikel ini membahas tentang penggunaan beberapa jenis katalis dalam mempercepat pembuatan biodiesel dari minyak goreng bekas.

2. Metode

Metode yang digunakan dalam artikel review ini yaitu studi literatur. Studi literatur adalah kajian yang dilakukan dengan cara mengumpulkan data dan informasi dari berbagai sumber seperti jurnal dan buku. Diawali dengan mengidentifikasi suatu masalah hingga analisis serta pembahasan yang berkaitan dengan sintesis biodiesel dengan menggunakan metode transesterifikasi menggunakan beberapa jenis katalis.

3. Minyak Goreng Bekas

Minyak goreng yang sudah tidak layak pakai memiliki ciri-ciri seperti bau tengik, warna yang berubah menjadi coklat hingga hitam, terdapat endapan, keruh dan berbuih. Minyak goreng bekas tidak dianjurkan untuk dikonsumsi kembali karena dapat menyebabkan gangguan kesehatan. Gangguan kesehatan tersebut meliputi kerusakan pada usus halus, penyumbatan pembuluh darah, masalah jantung, dan kerusakan pada organ hati. Kerusakan beberapa anggota tubuh tersebut terjadi karena asam lemak tak jenuh pada minyak goreng bekas teroksidasi membentuk radikal bebas [15]. Selain menyebabkan masalah kesehatan yang serius minyak goreng bekas jika dibuang sembarangan dapat menjadi masalah terhadap lingkungan [6,7]. Produksi biodiesel dalam skala besar memiliki biaya produksi yang tinggi karena

menggunakan jenis bahan baku yang mahal. Namun, minyak goreng bekas dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis untuk mengurangi biaya produksi [18].

Selain harga yang ekonomis minyak goreng bekas mempunyai kelemahan jika digunakan sebagai bahan produksi biodiesel yaitu tingginya kadar asam lemak bebas (FFA) [19]. Kualitas minyak goreng bekas tidak hanya dipengaruhi oleh kadar FFA, tetapi juga dipengaruhi oleh kadar air. Kadar air dalam minyak goreng bekas berasal dari air yang ada dalam minyak dan dari bahan makanan yang digoreng. Saat proses penggorengan sebagian kadar air akan menguap ke udara dan sebagian lainnya akan tetap berada dalam minyak [20].

Selain air, minyak goreng bekas juga mengandung senyawa peroksida. Senyawa ini terbentuk akibat seringnya penggunaan minyak goreng dalam proses penggorengan sehingga menyebabkan tingginya bilangan peroksida pada minyak. Hal ini terjadi karena oksidasi termal yang terjadi selama proses penggorengan, yaitu reaksi oksidasi yang dipicu oleh pemanasan dan terpapar udara yang menghasilkan senyawa peroksida dalam minyak [21]. Beberapa penelitian pada hewan menunjukkan bahwa paparan gugus bilangan peroksida dalam dosis yang tinggi dapat merangsang perkembangan kanker usus besar [22].

4. Efek FFA (*Free Fatty Acid*) Pada Produksi Biodiesel

Dalam proses reaksi transesterifikasi, kandungan FFA dan air merupakan parameter kunci untuk menentukan kualitas biodiesel yang dihasilkan [23]. Pada proses ini, FFA dan air selalu menyebabkan efek negatif seperti pembentukan sabun yang dapat mengurangi tingkat efektivitas katalis dan menghasilkan biodiesel dengan tingkat konversi yang rendah [24].

Pada reaksi transesterifikasi dengan penggunaan katalis basa, asam lemak bebas (FFA) akan bereaksi dengan katalis basa sehingga menghasilkan sabun. Sabun yang dihasilkan akan sulit untuk dipisahkan dari alkil ester yang dihasilkan dan pada proses pemurnian biodiesel setelah reaksi [25]. Maka dari itu dalam reaksi transesterifikasi menggunakan katalis basa kadar FFA yang diperlukan adalah kurang dari 3% dari berat total minyak [23].

Pada penelitian yang dilakukan oleh Ma et al dilaporkan dengan menurunkan kadar air dan FFA 5% menjadi kurang dari 1% dihasilkan yield biodiesel sebesar 98% melalui reaksi transesterifikasi dengan menggunakan katalis basa homogen NaOH pada rasio alkohol : katalis masing-masing 9:1 dan pada suhu 65-80°C [26].

5. Tahapan Pemurnian Minyak Goreng Bekas

Sebelum minyak goreng bekas masuk tahap transesterifikasi, minyak goreng bekas harus dimurnikan dari zat pengotornya melalui *degumming*, penguapan dan reaksi dengan gliserin dan katalis [11,12]. Proses-proses tersebut juga dapat mengurangi kandungan air dan FFA berlebih pada minyak goreng bekas [28].

Degumming merupakan tahap awal dalam proses pemurnian minyak, proses ini bertujuan untuk menghilangkan senyawa fosfatida. Penghilangan senyawa ini penting karena membuat minyak menjadi keruh dan mengandung kadar air berlebih [29].

Degumming mempunyai dua metode yaitu asam dan air. Dalam proses *degumming* menggunakan senyawa asam, senyawa asam dicampurkan dengan minyak sehingga kandungan fosfatida yang tidak larut dalam minyak bisa dihilangkan. Apabila menghilangkan fosfatida yang larut maka proses *degumming* digunakan dengan air. Dalam proses ini air dicampurkan dengan minyak pada suhu 60-90°C, kemudian minyak dan air dipisahkan dengan cara di sentrifugasi [29].

Untuk menghilangkan kandungan air berlebih dapat dihilangkan dengan memanaskan minyak pada suhu 100°C. Untuk mengurangi kandungan FFA yang berlebih pada minyak goreng bekas dapat dilakukan reaksi antara goreng bekas, gliserin dan katalis. Pada proses ini, minyak goreng bekas dicampurkan dengan gliserin kemudian ditambahkan katalis ZnCl₂ dan dipanaskan pada suhu 200°C. Dalam proses ini FFA akan mengalami perubahan menjadi senyawa monogliserida dan digliserida [28].

6. Metode Produksi Biodiesel

Beberapa metode yang dapat digunakan dalam produksi biodiesel, seperti metode mikroemulsi, metode pirolisis, *dilution/blending*, reaksi esterifikasi dan transesterifikasi (Tabel 1). Metode konvensional yang sering digunakan pada skala rumahan hingga industri adalah reaksi esterifikasi dan transesterifikasi (*alcoholysis*) [37].

Mikroemulsi pada produksi biodiesel merupakan metode produksi biodiesel dengan penambahan *emulsifier* atau surfaktan untuk menghasilkan larutan biodiesel yang stabil serta homogen [30]. Kelebihan dari metode ini adalah merupakan sistem yang baik untuk meningkatkan penyerapan dengan menghilangkan variabel pengganggu pada biodiesel dan secara termodinamik lebih stabil sehingga cocok jika biodiesel disimpan dalam jangka waktu yang lama. Kekurangan dari metode ini adalah penggunaan

jumlah surfaktan dan kosurfaktan yang berlebih dapat meningkatkan biaya produksi biodiesel[31]

Tabel 1. Kelebihan dan Kekurangan Metode Produksi Biodiesel

Teknik Produksi Biodiesel	Kelebihan	Kekurangan	Ref.
Mikroemulsi	<ul style="list-style-type: none"> – Proses penyerapan yang baik – Termodinamik larutan lebih stabil – Pembentukan biodiesel dengan viskositas yang rendah – Dapat meningkatkan angka cetana 	<ul style="list-style-type: none"> – Penggunaan surfaktan dan kosurfaktan berlebih dalam reaksi – Terjadinya penumpukan karbon – Biodiesel yang dihasilkan pembakarannya tidak sempurna 	[26,27]
Pirolisis	<ul style="list-style-type: none"> – Mekanisme proses sederhana – Bahan bakar terbarukan dengan sifat fisika dan kimia yang baik – Menghasilkan yield biodiesel tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> – Suhu reaksi tinggi – Biodiesel yang diperoleh masih terdapat sulfur – Terdapat produk samping hasil reaksi – Mahalnya biaya proses 	[25,28]
Esterifikasi dan Transesterifikasi	<ul style="list-style-type: none"> – Metode konvensional – FAME yang dihasilkan tinggi – Bahan baku yang tidak bereaksi dapat digunakan kembali 	<ul style="list-style-type: none"> – Dapat memicu korosi dalam reaktor – Terjadinya saponifikasi 	[19,20]
<i>Dilution/blending</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Biaya produksi rendah – Proses reaksi sederhana 	<ul style="list-style-type: none"> – Tingginya viskositas larutan yang dihasilkan – Kandungan FFA tinggi – Volatilitas rendah 	[23,24]

Pirolisis merupakan salah satu metode yang digunakan untuk produksi biodiesel. Pada metode ini material mengalami dekomposisi termal pada suhu tinggi dalam kondisi kedap udara. Proses ini dipengaruhi oleh variasi komposisi material kimia. Pada saat minyak goreng bekas digunakan sebagai bahan baku dan saat dipanaskan, minyak tersebut akan terurai sehingga hasil dari proses menyerupai bahan bakar diesel. Bahan bakar yang dihasilkan melalui proses ini mempunyai nilai kalor sama dengan bahan bakar diesel, serta titik nyala yang lebih rendah [38]. Kelebihan dari metode ini yaitu rangkaian proses produksi yang sederhana. Selain itu kekurangan dari metode ini dalam produksi biodiesel yaitu penggunaan suhu yang cukup tinggi dalam proses reaksinya. Suhu yang dibutuhkan dalam reaksi adalah 800°C sehingga dapat menambah biaya produksi [20].

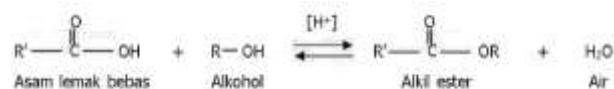
Reaksi esterifikasi dan transesterifikasi merupakan metode produksi biodiesel yang umum digunakan. Pada tahap esterifikasi FFA direaksikan dengan metanol menggunakan katalis asam, hal ini bertujuan untuk menurunkan kadar FFA yang tinggi dalam WFO. Sedangkan pada reaksi transesterifikasi trigliserida direaksikan dengan metanol dengan menggunakan katalis basa. Kelebihan dari metode ini adalah tingginya jumlah FAME (*fatty acid methyl esters*) yang dihasilkan.

Kekurangan metode ini adalah adanya kandungan gliserol sebagai hasil samping dari reaksi transesterifikasi dan katalis asam homogen

dapat memicu korosi dalam reaktor serta katalis basa homogen yang menyebabkan terjadinya saponifikasi [19,20].

7. Reaksi Esterifikasi

Reaksi esterifikasi adalah reaksi antara asam lemak bebas (FFA) dengan alkohol sehingga dihasilkan alkil ester. Reaksi tersebut berlangsung dengan menggunakan bantuan katalis asam kuat seperti H₂SO₄ dan HCl [41]. Proses ini digunakan ketika bahan baku pembuatan biodiesel memiliki kadar FFA tinggi lebih dari 5%. Tujuan dari proses ini adalah menurunkan kandungan asam lemak bebas (FFA). Reaksi yang terjadi pada proses ini yaitu reaksi endoterm dan memerlukan suhu reaksi sebesar 55-60°C [42]. Reaksi yang terjadi pada proses ini adalah sebagai berikut :

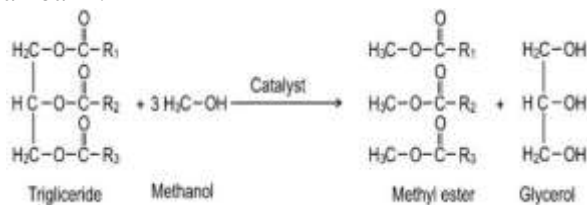


Gambar 1. Reaksi Esterifikasi [43]

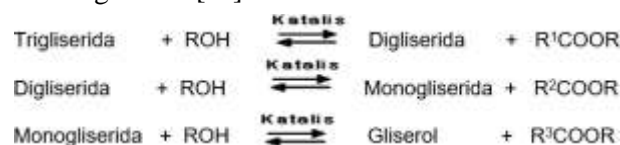
8. Reaksi Transesterifikasi

Biodiesel umumnya diperoleh dari reaksi transesterifikasi minyak tumbuhan atau lemak hewani dengan alkohol rantai pendek (pada umumnya metanol) [8]. Metanol merupakan jenis alkohol rantai pendek yang umum digunakan pada reaksi ini dikarenakan harganya yang terjangkau serta larutannya lebih polar dan rantai karbonnya yang lebih pendek dari etanol [44].

Transesterifikasi telah menjadi subjek beberapa studi sejak ide biodiesel diajukan. Pada tahun 1986, para peneliti melakukan analisis komparatif terhadap pemakaian minyak nabati sebagai alternatif bahan bakar mesin diesel. Kemudian pada tahun 1988, lipase digunakan sebagai katalisator dalam reaksi transesterifikasi. Secara tradisional, transesterifikasi dapat dilakukan dengan bantuan katalis heterogen dan homogen baik yang bersifat asam maupun basa [45]. Reaksi transesterifikasi yang diperoleh merupakan reaksi keseluruhan dari trigliserida. Pada reaksi ini terdapat tiga tahapan reaksi yang bersifat reversible seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Reaksi Transesterifikasi Keseluruhan dari Trigliserida [34].



Gambar 3. Tahapan Reaksi Transesterifikasi dari Trigliserida [34].

Secara umum katalis yang digunakan dalam reaksi transesterifikasi untuk memproduksi biodiesel adalah katalis asam (H_2SO_4 , AlCl_3 , NaOCH_3), katalis basa (NaOH , KOH , Li/CaO), dan katalis enzim (Lipase) [46].

9. Jenis – Jenis Katalis

Terdapat 3 jenis katalis yang digunakan dalam proses pembuatan biodiesel, diantaranya : katalis homogen (katalis asam dan basa), katalis heterogen (katalis asam dan basa) dan katalis enzim[37].

9.1 Katalis Homogen

Katalis homogen adalah katalis yang larut dalam reaktan dan/atau hasil reaksi [47]. Pada skala laboratorium maupun industri, katalis yang paling umum digunakan adalah katalis basa homogen. Metode ini dipilih karena dapat menghasilkan yield biodiesel yang tinggi (97% atau lebih) dalam waktu reaksi yang singkat (10-120 menit) pada temperatur reaksi yang rendah [10].

Katalis basa homogen umumnya digunakan dalam produksi biodiesel dan termasuk hidroksida logam seperti natrium dan kalium metoksida (NaOCH_3 , KOCH_3). Katalis ini umumnya digunakan dalam industri biodiesel karena dapat digunakan pada suhu reaksi rendah, dapat mencapai tingkat konversi yang tinggi dalam waktu singkat dan selalu tersedia dengan harga murah [35,40]. Laju reaksi katalis basa 4000 kali lebih cepat dibandingkan katalis asam [10]. Meskipun katalis basa digunakan secara luas dalam produksi biodiesel, namun terdapat kendala terkait dengan penggunaannya. Katalis basa sangat sensitif terhadap kandungan asam lemak bebas (FFA) dan kelembaban dalam proses reaksi transesterifikasi [48]. Kandungan FFA yang lebih tinggi dapat menyebabkan pembentukan sabun yang dapat mengurangi efektivitas katalis basa homogen dan mengurangi hasil biodiesel yang diperoleh [11].

Penggunaan katalis asam merupakan alternatif jika bahan baku yang digunakan mengandung kandungan asam lemak bebas (FFA) yang tinggi. Katalis asam dapat mencegah pembentukan sabun dan mengubah FFA menjadi ester melalui reaksi esterifikasi dan gliserida menjadi ester melalui reaksi transesterifikasi. Katalis asam dapat digunakan untuk kedua reaksi (esterifikasi dan transesterifikasi), sedangkan katalis basa dapat digunakan pada reaksi transesterifikasi [39,42]. Katalis asam yang sering digunakan adalah H_2SO_4 , HCl , asam sulfonat dan H_3PO_4 . Katalis H_2SO_4 pada umumnya sering digunakan sebagai katalis karena memiliki aktivitas katalis yang baik dan dapat langsung ditambahkan pada metanol [11].

Kelebihan menggunakan katalis asam antara lain tidak terpengaruhi oleh kandungan FFA dan dapat digunakan sebagai katalis pada dua reaksi (esterifikasi dan transesterifikasi). Katalis asam dapat menghasilkan biodiesel dari bahan baku berkualitas rendah seperti minyak goreng bekas dengan kandungan FFA di atas 6%. Selain itu, penggunaan katalis asam dengan satu tahapan proses lebih ekonomis dibandingkan proses dengan menggunakan katalis basa [50].

Katalis asam juga memiliki kekurangan diantaranya kecepatan reaksinya yang rendah, rasio molar alkohol/minyak yang tinggi dan limbah yang dihasilkan berdampak pada masalah lingkungan. Selain itu, masalah lainnya seperti korosi dan kesulitan dalam memisahkan katalis dari produk, kandungan FFA dan air yang dapat mengganggu reaksi [12].

Tabel 2. Berbagai Jenis Katalis, Kondisi Reaksi dan Hasil Reaksi Dalam Produksi Biodiesel.

Katalis	Jenis Katalis	Kondisi Reaksi *	% Yield Biodiesel	Ref
H ₂ SO ₄	Asam Homogen	14,7:1, 60, 60, 1	93,32%	[53]
H ₂ SO ₄	Asam Homogen	12:1, 60, 180, 5	95,37%	[54]
NaOCH ₃	Asam Homogen	6:1, 60, 60, 1	93%	[55]
TiO ₂ /MgO	Asam Heterogen	30:1, 65, 360, 10	92,3%	[56]
H ₃ PW ₁₂ O ₄₀ .6H ₂ O	Asam Heterogen	70:1, 150, 840, 10	88,6%	[4]
Fe ₂ O ₃ -MnO-SO ₄ ²⁻ /ZrO ₂	Asam Heterogen	20:1, 180, 240, 3	96,5%	[57]
CM-SO ₃ H	Asam Heterogen	9,35:1, 110, 120, 10	89,6%	[58]
NaOH	Basa Homogen	4,8:1, 60, 36, 0,6	98%	[59]
NaOH	Basa Homogen	7,5:1, 70, 30, 1,1	85,3%	[60]
NaOH	Basa Homogen	12:1, 60, 120, 1	95%	[61]
KOH	Basa Homogen	6:1, 60, 120, 6,1	95,8%	[62]
CH ₃ COOC ₂ H ₅	Basa Homogen	12:1, 40, 70, 1	88%	[63]
Al ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄	Basa Heterogen	3:1, 35, 35, 0,8	99,8%	[64]
K ₃ PO ₄	Basa Heterogen	6:1, 60, 120, 4	97,3%	[65]
CaO-MgO	Basa Heterogen	7:1, 75, 300, 3	98,95%	[66]
CaO-ZrO ₂	Basa Heterogen	30:1, 65, 120, 10	92,1%	[26]
Hybrid CaO/Al ₂ O ₃	Basa Heterogen	1:1, 65, 240, 1	89,9%	[67]
Lipase	Enzimatik	3:1, 30, 3000, 4	90,4%	[68]
Lipase Novozym 435	Enzimatik	3:1, 50, 1800, 4	90,9%	[69]
Lipase Novozym 435	Enzimatik	6:1, 60, 2400, 10	86,61%	[70]
Lipase from mixed cultures <i>B. cepacia</i> dan <i>B. subtilis</i>	Enzimatik	12:1, 35, 2600, -	93,61%	[71]
Lipase from <i>Candida rugosa</i> dan <i>Rhizomucor miehei</i>	Enzimatik	6:1, 45, 1440, 1	96,5%	[72]

* alkohol: oli, suhu (°C), waktu (menit), berat katalis (% dari total WFO)

9.2 Katalis Heterogen

Katalis heterogen adalah katalis yang tidak larut dalam reaktan dan/atau hasil reaksi [47]. Penggunaan katalis heterogen padat dapat menyelesaikan beberapa masalah yang terjadi pada penggunaan katalis homogen. Katalis heterogen dapat digunakan secara berulang dan hasil pemisahan produk akhirnya lebih baik. Penggunaan katalis heterogen dapat mengurangi biaya produksi, serta ramah terhadap lingkungan dan dapat digunakan berulang tanpa memerlukan tahap pemurnian. Dalam proses ini, kemurnian metil ester mencapai lebih dari 99% dengan *yield* biodiesel mendekati 100%. Proses transesterifikasi dengan katalis heterogen dapat menghasilkan gliserol sebagai produk samping dengan kemurnian lebih dari 98% dibanding dengan katalis homogen [13].

Meskipun katalis padat heterogen dapat mengatasi masalah yang terkait dengan katalis homogen, namun penggunaan katalis basa heterogen dibatasi dengan adanya kandungan FFA dalam bahan baku berkualitas rendah seperti minyak goreng bekas dan dapat digunakan ketika bahan baku memiliki kualitas yang baik [10].

9.3 Katalis Enzim

Biokatalis atau katalis enzim berasal dari enzim lipase yang dihasilkan oleh mikroorganisme, hewan dan tumbuhan [11]. Proses transesterifikasi enzimatik menarik minat para peneliti karena dapat mengatasi masalah yang terkait dengan reaksi transesterifikasi konvensional seperti sulitnya pemulihan gliserol dan produksi air yang tinggi sehingga dapat menyebabkan tingginya biaya produksi dan

pencemaran lingkungan. Katalis enzim memiliki keuntungan seperti aktivitas katalis yang tinggi, selektivitas, dan spesifisitas yang kompleks pada kondisi yang ramah lingkungan serta tidak adanya produk samping reaksi, kondisi reaksi pada suhu rendah, tidak sensitif terhadap minyak dengan kandungan FFA yang tinggi, dan katalis yang dapat digunakan kembali [36,39].

Kekurangan dari katalis enzim diantaranya reaksi terbatas pada rentang suhu tertentu, jika suhu terlalu tinggi maka protein dalam enzim akan terdenaturasi dan enzim tidak dapat bekerja secara optimal. Selain itu penggunaan enzim sebagai katalis masih terbatas karena harganya yang mahal, kecepatan reaksi yang relatif lambat, tidak stabil dan enzim dapat mengalami deaktivasi [14]. Beberapa literatur yang menggunakan 3 jenis katalis di atas disajikan dalam Tabel 2.

10. Tahapan Pemurnian Setelah Produksi

Agar produk biodiesel memenuhi standar kualitas, perlu diperhatikan bahwa biodiesel tidak boleh terkontaminasi dengan bahan yang dapat merusak mesin melalui terbentuknya endapan di ruang mesin dan menyebabkan korosi. Sumber pengotor tersebut berasal dari residu katalis, air, gliserol, atau alkohol berlebih yang tersisa setelah reaksi. Ketika biodiesel diproduksi dari *WFO*, senyawa lain akan muncul dalam reaksi seperti senyawa polar, dimer, mono, diasilgliserol dan *FFA* [51]. Kotoran yang dihasilkan dari *WFO* umumnya berbentuk padat dan dapat dihilangkan dengan sentrifugasi atau filtrasi sebelum tahap produksi biodiesel [52]. Pengotor tersebut perlu dihilangkan untuk menjaga kualitas biodiesel yang akan diproduksi. Terdapat beberapa metode untuk menghilangkan kotoran tersebut seperti membran, distilasi, pencucian basah dan pencucian kering [53]. Salah satu teknik utama yang digunakan dalam industri saat ini merupakan teknik pencucian basah (*Wet Washing*) serta terdapat juga teknik pencucian kering dengan adsorpsi (*Dry Washing*) [54].

Selain teknik pencucian kering juga terdapat teknik pencucian basah. Teknik ini merupakan teknik yang paling sering digunakan dalam skala rumahan ataupun industri. Prinsip dari teknik ini yaitu menghilangkan sisa gliserol serta metanol yang tidak bereaksi dengan katalis. Selain itu, teknik pencucian basah memiliki kekurangan dari segi waktu, karena membutuhkan sedikitnya 2,5 jam dan banyak air sehingga menghasilkan limbah berupa emulsi sabun, gliserol, dan metanol yang sulit dibuang begitu saja ke lingkungan [54]. Perbedaan pencucian basah dan pencucian kering dari jenis bahan serta

kandungan ester yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Jenis Bahan Pada Teknik Pencucian Basah dan Pencucian Kering.

Jenis Pencucian	Bahan	% Ester	Ref
Pencucian Basah	Asam Fosfat 5 %	92%	[55]
	Air Suling Panas	89%	[56]
	Asam Fosfat 1 %	93,5%	[12]
Pencucian Kering	Magnesol & Purolit	94,5%	[34]
	Abu Ampas Tebu	88%	[57]
	Abu Sekam Padi	83%	[58]

11. Baku Mutu Kualitas Biodiesel

Biodiesel yang dihasilkan dari *WFO* harus memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan pemerintah Indonesia dalam SNI 7182:2015 yang menyebutkan sebanyak 5 kriteria biodiesel sebagai pengganti bahan bakar solar konvensional yang harus dipenuhi supaya tidak terjadi masalah pada mesin diesel dan tetap aman untuk kendaraan maupun penggunaannya. Lima kriteria tersebut disebutkan pada tabel 4.

Menurut SNI 7182:2015, kadar air maksimum pada etil ester/metil ester adalah 0,05% dari total volume yang diperoleh. Semakin kecil kadar air dalam minyak, maka mutunya akan semakin baik karena akan memperkecil terjadinya hidrolisis yang dapat meningkatkan kadar asam lemak bebas. Selain itu, kandungan air dalam bahan bakar juga dapat menurunkan panas pembakaran, menyebabkan busa, dan bersifat korosif jika bereaksi dengan sulfur karena akan membentuk asam [59].

Densitas termasuk salah satu parameter yang diatur dalam SNI 7182:2015 mengenai biodiesel. Densitas yang diperoleh dari proses pembuatan biodiesel harus berada dalam rentang 0,85-0,89 gr/cm^3 . Proses pencucian dan pemurnian yang tidak sempurna akan menyebabkan peningkatan kadar densitas, yang akan mempengaruhi konsumsi bahan bakar [19].

Menurut standar mutu SNI 7182:2015 tentang Biodiesel, viskositas biodiesel yang diteliti tidak melebihi dari standar yang berlaku yaitu antara 2,3 – 6,0 mm^2/s (cSt)[60].

Flash Point atau titik nyala merupakan angka yang menyatakan suhu terendah dari bahan bakar minyak dapat terbakar jika permukaan minyak tersebut didekatkan dengan nyala api. Pada

standar mutu SNI 7182:2015 tentang biodiesel nilai flash point minimal 100°C untuk mengeliminasi kontaminasi metanol akibat proses konversi minyak nabati yang tidak sempurna. Penentuan titik nyala ini berkaitan dengan keamanan dalam penyimpanan dan penanganan bahan bakar [9]. Faktor yang mempengaruhi nilai flash point adalah jumlah penambahan katalis. Biodiesel yang memiliki nilai flash point yang lebih kecil cenderung lebih mudah terbakar dan memiliki perambatan api yang lebih cepat. Namun, jika nilai flash point terlalu tinggi, maka penyalanya akan sangat sulit dan membutuhkan lebih banyak energi untuk menyalakannya.[59].

Kadar metil ester yang diperbolehkan

menurut standar SNI 7182:2015 sebesar 96,5% dari keseluruhan massa hasil reaksi. Menurut Faizal et al. [61] jumlah metil ester dalam biodiesel dipengaruhi oleh waktu reaksi dan jumlah katalis yang digunakan. Semakin lama waktu reaksi, semakin banyak metil ester yang dihasilkan. Namun, jika waktu reaksi terlalu lama, dapat terjadi reaksi balik yang mengubah metil ester kembali menjadi trigliserida.

Selain SNI 7182:2015, standar mutu kualitas biodiesel juga ditetapkan nilainya pada masing-masing Negara antara lain, Amerika Serikat dengan ASTM D6751-09, dan Eropa dengan EN 14214 [61]. Berikut tabel perbandingan nilai standar kualitas biodiesel pada Negara Indonesia, Amerika Serikat dan Eropa.

Tabel 4. Standar Mutu Kualitas Biodiesel [54–56]

Standar Kualitas	SNI 7182:2015	ASTM D6751-09	EN 14214
Kadar Air (% dari total volume)	0,05	0,05	0,05
Densitas (g/cm ³)	0,85-0,89	-	0,86-0,9
Viskositas (cSt)	2,3-6,0	1,9-6,0	-
Flash Point Minimum (°C)	100	130	101
Kadar Metil Ester Angka Cetana (% massa)	96,5	90	96,5

12. Kualitas Biodiesel Minyak Goreng Bekas

Pada tabel 5 ditunjukkan hasil analisis dari pengujian penggunaan minyak goreng bekas sebagai bahan baku dalam pembuatan biodiesel, yang dilakukan oleh beberapa literatur. Terdapat berbagai jenis katalis yang digunakan tentu dengan besaran rasio alkohol: minyak yang berbeda-beda tiap peneliti. Peninjauan dilakukan dari jenis katalis yang dipakai, rasio alkohol dengan minyak, berat jenis yang dihasilkan, tingkat viskositas, bilangan asam, angka gliserol bebas serta hasil *yield* biodiesel yang diperoleh setelah percobaan dilakukan.

Pada penelitian biodiesel dari minyak goreng bekas salah satu katalis yang sering umum dipakai adalah NaOH seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Hadrah dkk pada Tahun 2018. Peneliti memperoleh % *yield* biodiesel sebesar 95% dengan perbandingan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1:4 [64].

Disamping itu penelitian yang dilakukan oleh

Prasetyo di Tahun 2018 dengan meningkatkan angka rasio molar alkohol : minyak yaitu sebesar 1 : 6 dapat memperoleh *yield* biodiesel sebesar 90% [65]. Hal ini tidak beda jauh dengan penelitian yang dilakukan oleh Haryanto dkk pada Tahun 2015 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak yang sama memperoleh *yield* biodiesel sebesar 91,10% [66]. sementara itu *yield* paling terbesar yang diperoleh dari penelitian busyairi tahun 2020 sebesar 98,42% dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak yang sama [59]. Dan penelitian yang dilakukan oleh Rahkadima pada Tahun 2016 menghasilkan *yield* biodiesel sebesar 81,33% dengan rasio molar alkohol : minyak yang sama [67]. Namun penelitian yang dilakukan oleh Sinaga dkk pada Tahun 2014 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak yang sama sebesar 1:6 memperoleh *yield* biodiesel sebesar 72,87% dan ini merupakan hasil *yield* terkecil dibanding peneliti yang menggunakan katalis NaOH dengan rasio molar alkohol : minyak yang sama [76].

Tabel 5. Kualitas Biodiesel dari Segi Berat Jenis, Viskositas, Bilangan Asam, dan Gliserol Bebas

Katalis	Rasio (oli: alkohol)	Kualitas Biodiesel				% Yield	Ref.
		Berat Jenis (Kg/L)	Viskositas (cSt)	Bilangan Asam (KOH/g)	Gliserol Bebas (% berat)		
NaOH	1:4	870	3,93	-	1,01	95%	[64]
NaOH	1:6	937	-	-	0,50	90%	[65]
NaOH	1:6	870	1,9	2,98	-	91,10%	[66]
NaOH	1:6	-	4,43	-	-	81,83%	[67]
NaOH	1:6	866	5,15	-	0,26	98,42%	[59]
KOH	1:5	870	2,35	0,8	0,04	99%	[68]
KOH	1:6	870	4,5	0,2	0,23	96,65%	[69]
KOH	1:6	870	-	0,4	0,50	99%	[70]
KOH	1:4	873	4,64	-	0,16	76,25%	[71]
KOH	1:5	870	4,5	-	0,23	90%	[72]
KOH	1:6	901	3,5	0,224	-	96,70%	[73]
H ₂ SO ₄	1:6	869	4,5	0,37	-	83,20%	[74]
H ₂ SO ₄	1:7	-	-	0,59	0,03	95,28%	[58]
TiO ₂	1:24	879	4,5	0,9	0,21	74,02%	[75]

Selain NaOH juga terdapat katalis seperti KOH yang sering digunakan dalam pembuatan biodiesel. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Wahyuni & Kadarwati di Tahun 2011 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1: 4 sehingga diperoleh *yield* biodiesel sebesar 76,25% [71]. Hal yang berbeda dilakukan oleh peneliti Rhofita pada Tahun 2016 yaitu dengan menaikkan angka rasio alkohol : minyak sebesar 1 : 5 sehingga memperoleh *yield* biodiesel sebesar 90% [72]. Tidak cukup sampai disitu terdapat peneliti seperti yang dilakukan oleh Elma di Tahun 2018 dengan menaikkan angka rasio molar alkohol : minyak sebesar 1 : 6 peneliti memperoleh *yield* biodiesel lebih tinggi dari peneliti sebelumnya yaitu sebesar 96,65% [69]. Hal yang sama juga dilakukan oleh Ahmad pada Tahun 2016 pada penelitiannya menggunakan rasio molar yang sama yakni sebesar 1 : 6 dan memperoleh *yield* biodiesel yang tidak kalah jauh dari sebelumnya sebesar 96,70% [73]. Namun terdapat beberapa penelitian seperti yang dilakukan oleh Husna di Tahun 2012 dan Kartika di Tahun 2013 dalam penelitiannya sama-sama memperoleh *yield* biodiesel sebesar 99% dengan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1: 6 [20].

Selain KOH dan NaOH sebagai katalis yang umum digunakan terdapat juga katalis H₂SO₄ yang digunakan oleh Efendi pada Tahun 2018 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1:6 *yield* biodiesel yang diperoleh sebesar 83,20% [74], sementara itu pada

penelitian yang dilakukan oleh Hadi dkk di Tahun 2013 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1:7 *yield* biodiesel yang diperoleh jauh lebih besar dari peneliti sebelumnya yaitu 95,28% [58]. Selain H₂SO₄ juga terdapat katalis TiO₂ yang digunakan oleh Clowutimon dkk pada Tahun 2011 dengan menggunakan rasio molar alkohol : minyak sebesar 1 : 24 hasil *yield* biodiesel yang diperoleh sebesar 74,02% [75].

KESIMPULAN

Metode produksi biodiesel umumnya menggunakan reaksi esterifikasi dan transesterifikasi karena prosesnya sederhana dan lebih ekonomis dibandingkan metode lain. Pada reaksi transesterifikasi minyak goreng bekas dapat menggunakan beberapa jenis katalis seperti katalis asam, basa, dan enzim baik homogen maupun heterogen.

Berdasarkan hasil data dari berbagai literatur katalis basa heterogen dengan CaO-MgO sebagai katalis memiliki *yield* paling besar yaitu 98,95%, diikuti oleh katalis basa homogen dengan katalis NaOH memiliki *yield* sebesar 98%. Sedangkan katalis asam heterogen memiliki *yield* lebih besar dengan katalis Fe₂O₃-MnO-SO₄²⁻/ZrO₂ memiliki *yield* lebih besar yaitu 96,5% dibandingkan dengan katalis asam homogen yang memiliki *yield* sebesar 95,37% dengan katalis H₂SO₄. Katalis enzim dengan menggunakan enzim Lipase dari *Candida rugosa* dan *Rhizomucor miehei* memiliki *yield* sebesar 96,5%.

Berdasarkan data dari berbagai literatur yang diperoleh, minyak goreng bekas dapat dikonversi menjadi biodiesel dengan menggunakan beberapa jenis katalis dan hasilnya memenuhi kriteria kualitas biodiesel menurut SNI 7182:2015.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Baskar, I. Aberna Ebenezer Selvakumari, and R. Aiswarya, "Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst," *Bioresour. Technol.*, vol. 250, pp. 793–798, 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.12.010.
- [2] A. Sander, M. Antonije Koščak, D. Kosir, N. Milosavljević, J. Parlov Vuković, and L. Magić, "The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality," *Renew. Energy*, vol. 118, pp. 752–760, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.068.
- [3] N. Mansir *et al.*, "Modified waste egg shell derived bifunctional catalyst for biodiesel production from high FFA waste cooking oil. A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. May 2017, pp. 3645–3655, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.098.
- [4] A. Pradana, K. E. Sularso, I. Kartika, and E. Wijayanti, "Analisis Faktor yang Berpengaruh terhadap Ekspor Biodiesel di Uni Eropa terbesar di Uni Eropa memiliki peran yang melimpahnya sumber daya alam yaitu luas biodiesel terbesar di Uni Eropa, namun diimbangi dengan produksi yang tinggi juga biodiesel biodiese," vol. 1, no. 1, pp. 41–50, 2021.
- [5] I. Q. Almagribi, A. H. Dzakiyy, and H. Hafizh, "Pemanfaatan Kulit Pisang sebagai Penjernihan Minyak Jelantah Solusi untuk Kelangkaan Minyak Goreng bagi Masyarakat," *Esabi*, vol. 4, no. 2, pp. 1–8, 2022.
- [6] A. Talebian-Kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 683–710, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.061.
- [7] M. Atapour, H. R. Kariminia, and P. M. Moslehabadi, "Optimization of biodiesel production by alkali-catalyzed transesterification of used frying oil," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 2, pp. 179–185, 2014, doi: 10.1016/j.psep.2012.12.005.
- [8] dan D. P. Samik, Ratna Ediati, "Review : Pengaruh Kebiasaan dan Luas Permukaan Katalis Terhadap Aktivitas Katalis Basa Heterogen untuk Produksi Biodiesel Samik *, Ratna Ediati, dan Didik Prasetyoko B - 462 Prosiding Seminar Nasional Kimia Unesa 2011 – ISBN : 978-979-028-378-7," pp. 978–979, 2011.
- [9] S. M. Santos, D. C. Nascimento, M. C. Costa, A. M. B. Neto, and L. V. Fregolente, "Flash point prediction: Reviewing empirical models for hydrocarbons, petroleum fraction, biodiesel, and blends," *Fuel*, vol. 263, no. October 2019, p. 116375, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116375.
- [10] T. Issariyakul and A. K. Dalai, "Biodiesel from vegetable oils," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 446–471, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.11.001.
- [11] L. Buchori, I. Istadi, and P. Purwanto, "Perkembangan Proses Produksi Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *Pros. Semin. Nas. Tek. Kim. "Kejuangan,"* pp. 1–9, 2015.
- [12] M. C. Manique, C. S. Faccini, B. Onorevoli, E. V. Benvenuti, and E. B. Caramão, "Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil," *Fuel*, vol. 92, no. 1, pp. 56–61, 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2011.07.024.
- [13] A. K. Endalew, Y. Kiros, and R. Zanzi, "Heterogeneous catalysis for biodiesel production from *Jatropha curcas* oil (JCO)," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2693–2700, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.02.010.
- [14] A. Bajaj, P. Lohan, P. N. Jha, and R. Mehrotra, "Biodiesel production through lipase catalyzed transesterification: An overview," *J. Mol. Catal. B Enzym.*, vol. 62, no. 1, pp. 9–14, 2010, doi: 10.1016/j.molcatb.2009.09.018.
- [15] M. Megawati and Muhartono, "Konsumsi Minyak Jelantah dan Pengaruhnya terhadap Kesehatan," *Majority*, vol. 8, no. 2, pp. 259–264, 2019.
- [16] D. A. A. Yuarini, G. P. G. Putra, L. P. Wrasati, and A. A. P. S. Wiranatha, "Karakteristik minyak goreng bekas yang dihasilkan di kota Denpasar," *Sci. J. Food Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 49–55, 2018.
- [17] D. Na-Ranong, P. Laungthaleongpong, and S. Khambung, "Removal of steryl glucosides in palm oil based biodiesel using magnesium silicate and bleaching earth," *Fuel*, vol. 143, pp. 229–235, 2015, doi: 10.1016/j.fuel.2014.11.049.
- [18] L. Sapei, Padmawijaya, K. Samuel., A. Sutejo, and L. Theresia, "Temperatur Leaching Menggunakan Asam Asetat," *J. Tek. Kim.*, vol. 9, no. 2, pp. 38–43, 2015.
- [19] E. Dwi, I. Teknologi Sepuluh Nopember, L.

- Pujaningtiyas, and I. Teknologi Sepuluh Nopember, "Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Goreng Bekas Dengan Proses," *J. Tek.*, vol. 28, no. 2, pp. 83–93, 2017, [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/44870/>
- [20] D. Kartika and S. Widyaningsih, "Konsentrasi Katalis dan Suhu Optimum pada Reaksi Esterifikasi menggunakan Katalis Zeolit Alam Aktif (ZAH) dalam Pembuatan Biodiesel dari Minyak Jelantah," *J. Natur Indones.*, vol. 14, no. 3, p. 219, 2013, doi: 10.31258/jnat.14.3.219-226.
- [21] A. Islam, Y. H. Taufiq-Yap, C. M. Chu, E. S. Chan, and P. Ravindra, "Studies on design of heterogeneous catalysts for biodiesel production," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 91, no. 1–2, pp. 131–144, 2013, doi: 10.1016/j.psep.2012.01.002.
- [22] I. W. Suirta, "PREPARASI BIODIESEL DARI MINYAK JELANTAH KELAPA SAWIT I W. Suirta," pp. 1–6, 2003.
- [23] L. C. Meher, D. Vidya Sagar, and S. N. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, 2006, doi: 10.1016/j.rser.2004.09.002.
- [24] A. Demirbas and S. Karslioglu, "Biodiesel production facilities from vegetable oils and animal fats," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 29, no. 2, pp. 133–141, 2007, doi: 10.1080/009083190951320.
- [25] M. Canakci and J. Van Gerpen, "A PILOT PLANT TO PRODUCE BIODIESEL FROM HIGH FREE FATTY ACID FEEDSTOCKS," vol. 46, no. 4, pp. 945–954, 2003.
- [26] V. K. Mishra and R. Goswami, "A review of production, properties and advantages of biodiesel," *Biofuels*, vol. 9, no. 2, pp. 273–289, 2018, doi: 10.1080/17597269.2017.1336350.
- [27] N. Pratiwi and I. Prihatiningtyas, "Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia 'Kejuangan' Perbandingan Proses Esterifikasi dan Esterifikasi-Trans-esterifikasi dalam Pembuatan Biodisel dari Minyak Jelantah," *Pros. Semin. Nas. Tek. Kim. "Kejuangan"*, vol. 4, no. 1, pp. 1–7, 2016.
- [28] D. Singh *et al.*, "A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock," *J. Clean. Prod.*, vol. 307, no. May 2020, p. 127299, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127299.
- [29] D. Singh, D. Sharma, S. L. Soni, S. Sharma, P. Kumar Sharma, and A. Jhalani, "A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel," *Fuel*, vol. 262, no. October, p. 116553, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116553.
- [30] B. Solar and F. Dimawarnita, "Surfaktan Untuk Bahan Bakar Solar Dan Biodiesel," *J. Teknol. Ind. Pertan.*, vol. 31, no. September 2018, pp. 120–128, 2021, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.2.120.
- [31] S. N. Kale and S. L. Deore, "Emulsion micro emulsion and nano emulsion: A review," *Syst. Rev. Pharm.*, vol. 8, no. 1, pp. 39–47, 2016, doi: 10.5530/srp.2017.1.8.
- [32] F. Baani, "Pirolisis cerdas: mengubah sampah plastik menjadi sumber bahan bakar," *Tek. Mesin*, 2014.
- [33] J. Maaira, A. Santana, F. Recasens, and M. Angeles Larrayoz, "Biodiesel production using supercritical methanol/carbon dioxide mixtures in a continuous reactor," *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2280–2288, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.02.017.
- [34] T. Sabudak and M. Yildiz, "Biodiesel production from waste frying oils and its quality control," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 5, pp. 799–803, 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.007.
- [35] M. Mofijur *et al.*, "Effect of nanocatalysts on the transesterification reaction of first, second and third generation biodiesel sources- A mini-review," *Chemosphere*, vol. 270, p. 128642, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128642.
- [36] M. Franjo, A. Šalić, and B. Zelić, "Microstructured devices for biodiesel production by transesterification," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 8, no. 4, pp. 1005–1020, 2018, doi: 10.1007/s13399-018-0341-7.
- [37] J. M. Fonseca, J. G. Teleken, V. de Cinque Almeida, and C. da Silva, "Biodiesel from waste frying oils: Methods of production and purification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 184, no. January, pp. 205–218, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.061.
- [38] G. Francis, R. Edinger, and K. Becker, "A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations," *Nat. Resour. Forum*, vol. 29, no. 1, pp. 12–24, 2005, doi: 10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.
- [39] H. Niawanti, "Review Perkembangan

- Metode Produksi Dan Teknologi Pemurnian Dalam Pembuatan Biodiesel,” *J. Chemurg.*, vol. 4, no. 1, p. 27, 2020, doi: 10.30872/cmg.v4i1.4107.
- [40] E. Kurniasih, “Produksi Biodiesel dari Crude Palm Oil melalui Reaksi Dua Tahap,” *Lhokseumawe Politek. Negeri Lhokseumawe*, pp. 70–76, 2012.
- [41] D. S. Prayanto, M. Salahudin, L. Qadariyah, and M. Mahfud, “Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Kelapa Dengan Katalis NaOH Menggunakan Gelombang Mikro (Microwave) Secara Kontinyu,” *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i1.15173.
- [42] A. Sartika, Nurhayati, and Muhdarina, “Esterifikasi Minyak Goreng Bekas dengan Katalis H₂SO₄ dan Transesterifikasi dengan Katalis CaO dari Cangkang Kerang Darah: Variasi Kondisi Esterifikasi,” *Jom Fmipa*, vol. 2, no. 1, pp. 178–185, 2015.
- [43] S. Niju, M. Balajii, and C. Anushya, “A comprehensive review on biodiesel production using Moringa oleifera oil,” *Int. J. Green Energy*, vol. 16, no. 9, pp. 702–715, 2019, doi: 10.1080/15435075.2019.1619565.
- [44] Z. Helwani, M. R. Othman, N. Aziz, J. Kim, and W. J. N. Fernando, “Solid heterogeneous catalysts for transesterification of triglycerides with methanol: A review,” *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 363, no. 1–2, pp. 1–10, 2009, doi: 10.1016/j.apcata.2009.05.021.
- [45] A. Molaei Dehkordi and M. Ghasemi, “Transesterification of waste cooking oil to biodiesel using Ca and Zr mixed oxides as heterogeneous base catalysts,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 97, pp. 45–51, 2012, doi: 10.1016/j.fuproc.2012.01.010.
- [46] C. S. MacLeod, A. P. Harvey, A. F. Lee, and K. Wilson, “Evaluation of the activity and stability of alkali-doped metal oxide catalysts for application to an intensified method of biodiesel production,” *Chem. Eng. J.*, vol. 135, no. 1–2, pp. 63–70, 2008, doi: 10.1016/j.cej.2007.04.014.
- [47] Hartati *et al.*, “Selective hierarchical aluminosilicates for acetalization reaction with propylene glycol,” *Indones. J. Chem.*, vol. 19, no. 4, pp. 975–984, 2019, doi: 10.22146/ijc.40106.
- [48] F. Ma and M. A. Hanna, “Biodiesel production: a review | Journal Series #12109, Agricultural Research Division, Institute of Agriculture and Natural Resources, University of Nebraska–Lincoln.1,” *Bioresour. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, 1999, doi: 10.1016/s0960-8524(99)00025-5.
- [49] M. G. Kulkarni and A. K. Dalai, “Waste cooking oil - An economical source for biodiesel: A review,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 45, no. 9, pp. 2901–2913, 2006, doi: 10.1021/ie0510526.
- [50] K. Jacobson, R. Gopinath, L. C. Meher, and A. K. Dalai, “Solid acid catalyzed biodiesel production from waste cooking oil,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 85, no. 1–2, pp. 86–91, 2008, doi: 10.1016/j.apcatb.2008.07.005.
- [51] A. J. A. De Paula, M. Krügel, J. Paulo Miranda, L. F. D. S. Rossi, and P. R. D. C. Neto, “Biodiesel use of clays for purification of biodiesel,” *Quim. Nova*, vol. 34, no. 1, pp. 91–95, 2011, doi: 10.1590/s0100-40422011000100018.
- [52] A. Demirbas, “Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.12.023.
- [53] M. Berrios and R. L. Skelton, “Comparison of purification methods for biodiesel,” *Chem. Eng. J.*, vol. 144, no. 3, pp. 459–465, 2008, doi: 10.1016/j.cej.2008.07.019.
- [54] J. Saleh, M. A. Dubé, and A. Y. Tremblay, “Effect of soap, methanol, and water on glycerol particle size in biodiesel purification,” *Energy and Fuels*, vol. 24, no. 11, pp. 6179–6186, 2010, doi: 10.1021/ef1011353.
- [55] Z. J. Predojević, “The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps,” *Fuel*, vol. 87, no. 17–18, pp. 3522–3528, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.07.003.
- [56] S. M. Hingu, P. R. Gogate, and V. K. Rathod, “Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors,” *Ultrason. Sonochem.*, vol. 17, no. 5, pp. 827–832, 2010, doi: 10.1016/j.ultsonch.2010.02.010.
- [57] L. T. Schneider, G. Bonassa, H. J. Alves, T. R. W. Meier, E. P. Frigo, and J. G. Teleken, “Use of rice husk in waste cooking oil pretreatment,” *Environ. Technol. (United Kingdom)*, vol. 40, no. 5, pp. 594–604, 2019, doi: 10.1080/09593330.2017.1397772.
- [58] I. Hadi, M. Arsa, and I. Sudiarta, “Sintesis Silika Gel Dari Abu Sekam Padi Dan Abu Limbah Pembakaran Batu-Bata Dengan Metode Presipitasi,” *J. Kim.*, vol. 7, no. 1, pp. 31–38, 2013.
- [59] M. Busyairi, A. Z. Muttaqin, I. Meicahyanti, and S. Saryadi, “Potensi Minyak Jelantah

- Sebagai Biodiesel dan Pengaruh Katalis Serta Waktu Reaksi Terhadap Kualitas Biodiesel Melalui Proses Transesterifikasi,” *J. Serambi Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 933–940, 2020, doi: 10.32672/jse.v5i2.1920.
- [60] Kementrian ESDM, “Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Nabati (Biofuel) Jenis Biodiesel Sebagai Bahan Bakar Lain Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri,” *189 K/10/Dje/2019*, no. 1, p. 5, 2019.
- [61] M. Faizal, U. Maftuchah, and W. A. Auriyani, “Pengaruh Kadar Metanol, Jumlah Katalis, Dan Waktu Reaksi Pada Pembuatan Biodiesel Dari Lemak Sapi Melalui Proses Transesterifikasi,” *J. Tek. Kim.*, vol. 19, no. 4, pp. 29–37, 2013.
- [62] O. Igbum, “Effects of Transesterification Variables on the Characteristics of the Methyl Esters Obtained from Four Virgin Tropical Seed Oils in Nigeria,” *Int. Res. J. Pure Appl. Chem.*, vol. 2, no. 4, pp. 230–246, 2012, doi: 10.9734/irjpac/2014/2081.
- [63] K. Kołwzan and M. Narewski, “Alternative Fuels for Marine Applications,” *Latv. J. Chem.*, vol. 51, no. 4, pp. 398–406, 2013, doi: 10.2478/v10161-012-0024-9.
- [64] H. Hadrah, M. Kasman, and F. M. Sari, “Analisis Minyak Jelantah Sebagai Bahan Bakar Biodiesel dengan Proses Transesterifikasi,” *J. Daur Lingkung.*, vol. 1, no. 1, p. 16, 2018, doi: 10.33087/daurling.v1i1.4.
- [65] J. Prasetyo, “Studi Pemanfaatan Minyak Jelantah Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biodiesel,” *J. Ilm. Tek. Kim.*, vol. 2, no. 2, p. 45, 2018, doi: 10.32493/jtk.v2i2.1679.
- [66] A. Haryanto, U. Silviana, S. Triyono, and S. Prabawa, “Produksi Biodiesel Dari Transesterifikasi Minyak Jelantah Dengan Bantuan Gelombang Mikro: Pengaruh Intensitas Daya Dan Waktu Reaksi Terhadap Rendemen Dan Karakteristik Biodiesel,” *J. Agritech*, vol. 35, no. 02, p. 234, 2015, doi: 10.22146/agritech.13792.
- [67] Y. T. Rahkadima *et al.*, “Produksi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis kalsium oksida,” *J. Res. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 44–48, 2016, [Online]. Available: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/jrt/article/view/20/21>
- [68] N. El Husna *et al.*, “the Characteristics of Biodiesel Transesterification Used Cooking Oil By,” no. 2, 2012.
- [69] M. Elma, S. A. Suhendra, and W. Wahyuddin, “Proses Pembuatan Biodiesel Dari Campuran Minyak Kelapa Dan Minyak Jelantah,” *Konversi*, vol. 5, no. 1, p. 8, 2018, doi: 10.31213/k.v5i1.23.
- [70] F. Furqon, A. K. Nugroho, and M. K. Anshorulloh, “Kajian Penggunaan Katalis KOH pada Pembuatan Biodiesel Menggunakan Reverse Flow Biodiesel Reactor secara Batch,” *Rona Tek. Pertan.*, vol. 12, no. 1, pp. 22–31, 2019, doi: 10.17969/rtp.v12i1.12508.
- [71] S. Wahyuni, S. Kadarwati, S. Wahyuni, and S. Kadarwati, “Sintesis Biodiesel Dari Minyak Jelantah Sebagai Sumber Energi Alternatif Solar,” *Sint. Biodiesel Dari Miny. Jelantah Sebagai Sumber Energi Altern. Sol.*, vol. 9, no. 1, pp. 51–62, 2011, doi: 10.15294/saintekno.v9i1.5525.
- [72] E. I. Rhofita, “PEMANFAATAN MINYAK JELANTAH SEBAGAI BIODIESEL: KAJIAN TEMPERATUR DAN WAKTU REAKSI TRANSESTERIFIKASI Erry Ika Rhofita 1,” *J. Ilmu-Ilmu Tek. - Sist.*, vol. 12, no. 3, pp. 141–150, 2016.
- [73] H. S. Ahmad, N. Bialangi, Y. K. Salimi, and J. Kimia, “Pengolahan Minyak Jelantah Menjadi Biodiesel,” *Entropi*, vol. 11, pp. 204–214, 2016.
- [74] R. Efendi, H. A. N. Faiz, and E. R. Firdaus, “Pembuatan Biodiesel Minyak Jelantah Menggunakan Metode Esterifikasi-Trasesterifikasi Berdasarkan Jumlah Pemakaian Minyak Jelantah,” *Ind. Res.*, no. 7182, pp. 402–409, 2018.
- [75] W. Clowutimon, P. Kitchaiya, and P. Assawasaengrat, “Adsorption of free fatty acid from crude palm oil on magnesium silicate derived from rice husk,” *Eng. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 16–25, 2011, doi: 10.4186/ej.2011.15.3.15.
- [76] S. V. Sinaga, A. Haryanto, and S. Triyono, “Pengaruh Suhu Dan Waktu Reaksi Pada Pembuatan Biodiesel Dari Minyak Jelantah [Effects of Temperature and Reaction Time on the Biodiesel Production Using Waste Cooking Oil],” *J. Tek. Pertan. Lampung*, vol. 3, no. 1, pp. 27–34, 2014, [Online]. Available: <http://www.youtube.com>.